



Bioforsk Rapport

Vol. 2 Nr. 48 2007

Effekter av flom/oversvømmelser på vannkvalitet, med fokus på sediment og fosfor - en litteraturgjennomgang

Eggestad H.O., Sveistrup T., Øgaard A.F. og Kitterød N.-O.
Bioforsk Jord og miljø



**Hovedkontor**

Frederik A. Dahls vei 20,
1432 Ås
Norway
Tel.: +47 40 60 41 00
Fax: +47 63 00 92 10
post@bioforsk.no

Bioforsk jord og miljø

Fredrik A. Dahls veg 20
1432 Ås
Norway
Tel: +47 46 41 35 00
Fax: +47 63 00 94 10
jord@bioforsk.no

Tittel/Title:

Effekter av flom/oversvømmelser på vannkvalitet, med fokus på sediment og fosfor- en litteraturoversikt.

Forfatter(e)/Autor(s):

Hans Olav Eggestad, Tore Sveistrup, Anne Falk Øgaard og Nils-Otto Kitterød

Dato/Date: 10/04/07	Tilgjengelighet/Availability: Åpen	Prosjekt nr./Project No.: 2110246	Arkiv nr./Archive No.: 2007/309
Rapport nr./Report No.: 48/2007	ISBN-nr.: 978-82-17-00020-4	Antall sider/Number of pages: 18	Antall vedlegg/Number of appendix: 0

Oppdragsgiver/Employer:

Miljøprosjektet i Haldenvassdraget

Kontaktperson/Contact person:

Steinar Fundingsrud

Stikkord/Keywords:

Jorderosjon, sedimenttransport, fosfortransport, flom
Soil erosion, sediment transport, phosphorous transport, flood

Fagområde/Field of work:

Jordfysikk, jordkjemi
Soil physics, soil chemistry

Sammendrag:

Miljøprosjektet i Haldenvassdraget ønsker å få utredet effekten av oversvømmelser på vannkvaliteten i vassdraget. Vassdraget er regulert og dersom oversvømmelser påvirker vannkvaliteten negativt kan det være aktuelt å prøve å få endret manøvreringsreglementet. Denne rapporten gir en kunnskapssammenstilling av generelle effekter av oversvømmelser på forurensning fra jordbruksarealer med særlig fokus på partikler (erosjon) og fosfor. Endringer i vannkvaliteten under oversvømmelser kan skje i form av erosjon eller sedimentasjon av partikler (og partikulært bundet fosfor) og som resultat av utløsning eller binding av løst fosfor. Erosjon og sedimentasjon kan også skje internt i jordmassene. Effektene vil avhenge av vannhastighetene på de oversvømte arealene, størrelsen på oversvømmelsene, varigheten og tilstanden på arealene. Rapporten omhandler også mulighetene for i en videre studie å beregne effekter for Haldenvassdraget og en oversikt over et slikt undersøkelsesprogram er gitt i rapporten. Se utvidet sammendrag for mer detaljert beskrivelse.

Ansvarlig leder/Responsible leader

Lillian Øygarden, Forskningssjef

Prosjektleder/Project leader

Hans Olav Eggestad, Forsker

Forord

Denne rapporten er laget på oppdrag av «Miljøprosjektet i Haldenvassdraget» og har en budsjett-ramme på kr 50.000,-. *Miljøprosjektet i Haldenvassdraget* ønsket å få utredet effekten av oversvømmelser på vannkvaliteten i vassdraget. Vassdraget er regulert og dersom oversvømmelser påvirker vannkvaliteten negativt kan det være aktuelt å prøve å få endret manøvreringsreglementet slik at risikoen for oversvømmelser reduseres. Oppdraget ble i første omgang avgrenset til å foreta en kunnskapssammenstilling/litteraturstudie for å finne ut om det pr idag er mulig rent faglig å gjøre en slik beregning, og dernest hvis mulig foreta beregningene i et eventuelt nytt prosjekt.

Ut fra gitte tidsfrist og økonomisk ramme, har det bare vært mulig å gjøre litteratursøk i databaser med publikasjoner tilgjengelig på internett.

Innhold

1	Sammendrag	5
2	Innledning	7
3	Hydrologi og flom	8
4	Erosjon og sedimentasjon på dyrka mark	10
5	Partikkeltransport gjennom grøftesystem	12
6	Frigjøring av løst fosfor fra jord	14
7	Konklusjoner	16
8	Referanser	17

1 Sammendrag

Miljøprosjektet i Haldenvassdraget ønsker å få utredet effekten av oversvømmelser på vannkvaliteten i vassdraget. Vassdraget er regulert og dersom oversvømmelser påvirker vannkvaliteten negativt kan det være aktuelt å prøve å få endret manøvreringsreglementet slik at risikoen for oversvømmelser reduseres. Oppdraget ble i første omgang avgrenset til å foreta en kunnskapssammenstilling/litteraturstudie for å finne ut om det faglig sett er mulig å foreta en slik beregning med rimelig grad av sikkerhet, og dernest, hvis dette anses som mulig, foreta beregningene i et eventuelt oppfølgingsprosjekt. Fokuset er lagt på hvordan oversvømmelser påvirker innholdet av partikler og fosfor i flomvannet. Eventuelle effekter på oversvømmede jordbruksarealer som sådan eller på selve elvestrengen er ikke behandlet.

Endringer i vannkvaliteten under oversvømmelser kan skje i form av erosjon eller sedimentasjon av partikler (og partikulært bundet fosfor) og som resultat av utløsning eller binding av løst fosfor. Erosjon og sedimentasjon kan også skje internt i jordmassene.

Om det oppstår netto erosjon eller sedimentasjon på jordoverflaten, avhenger av vannhastighet og motstand mot erosjon/løsrivelse. Innholdet av suspendert materiale i vannet som oversvømmer arealet vil også ha betydning. Hvilke vannhastigheter en har inne på de oversvømte arealene under en flom, avhenger av størrelsen på oversvømmelsen og gradienten (fallet) på den oversvømte strekningen. Motstand mot erosjon avhenger av jordfysiske forhold, som jordart, innhold av organisk materiale og vekst/jordarbeiding. Etter frost vil jorda være finmuldret og ekstra utsatt for erosjon. I faglitteraturen er det ikke funnet spesifikke sammenhenger mellom arealtilstand, jordart, vannhastigheter (eller gradient) i vassdraget og erosjon/sedimentasjon. Det vil derfor være en nokså stor gråson med tanke på gradient (fall) i elva kombinert med flomstørrelse hvor det er vanskelig å vite om effekten av oversvømmelsen er negativ eller positiv på vannkvaliteten.

Transport av partikler fra et oversvømmet areal vil også skje gjennom grøftesystemer. Fenomenet er dokumentert å foregå i norske jordarter, men det er ikke kvantifisert hvilken betydning dette kan ha for det totale partikkeltapet.

Når det gjelder oversvømmelsers effekt på innholdet av løst fosfor i flom-/avrenningsvannet, så finnes det ikke undersøkelser som har målt dette direkte i en flomsituasjon. Denne effekten er sannsynligvis svært avhengig av hydrologiske forhold. Dersom det ikke finnes noen vertikal gradient på vannet under oversvømmelsen vil porevannet stå i ro og fosforet kan tapes via diffusjon til overvannet. Hvis det derimot er trykk av drensvann fra bakenforliggende arealer, vil det oppstå et vannsig oppover i jordprofilen som vil kunne løse ut fosfor i plogsjiktet. I hvilken grad dette vil skje avhenger av fosforkonsentrasjonen i drensvannet fra de bakenforliggende arealene. I de tilfellene hvor oversvømmelsene skjer på arealer som allerede er «tørket» opp (ingen grøfteavrenning), vil det være flomvannet som fyller opp jorda, og dette vil sannsynligvis kunne løse ut noe fosfor.

Dersom porevannet blir stående i ro over lengre tid, øker også risikoen for at oksygenet blir brukt opp og det kan oppstå frigjøring av fosfor som er bundet til jern. Hvor lenge oversvømmelsen må vare for at denne prosessen skal starte er avhengig av den biologiske aktiviteten, men med oversvømmelser under høst/vinter/vår-perioden er temperaturene normalt så lave at risikoen for denne typen fosforfrigjøring sannsynligvis ikke er så stor. Det er ikke funnet grunnlag i litteraturen for å beregne hvor mye som kan

løses ut.

Utløsning av løst fosfor vil også være svært avhengig av varigheten av oversvømmelsen.

Når oversvømmelsen er over, dreneres porevannet, og den delen av dette som dreneres gjennom sprekker og makroporer kan være det mest fosforrike vannet som renner av i løpet av en flomepisode. Dette vannet kommer til resipienten i siste delen av flommen og vil kunne ha relativ stor innflytelse på vannkvaliteten i resipienten.

Flom som oppstår i tiden like etter såing og gjødsling vil kunne få ekstra store konsekvenser, både i form av erosjon og utlekking av fosfor fra gjødsla på åkerarealer. Konsekvensene kan også være store der gjødsla spres på overflaten som ved grasdyrking eller for høstkornarealer som vårgjødsles.

Bidrag til vannkvaliteten i form av utløst fosfor fra planterester og ekskrementer fra beitedyr vil i korndistrikter (uten fangvekst) sannsynligvis være neglisjerbar.

Det finnes utenlandske undersøkelser som har studert effekt av oversvømmelser på innholdet av total-fosfor i flomvannet, og funnet både positiv effekt og ingen effekt, men det er ikke funnet noen som har undersøkt utløsning av fosfor som følge av anaerobe forhold på de oversvømmede arealene.

Litteraturgjennomgangen gir få holdepunkter for å kunne gjøre en vurdering av effekter av oversvømmelser på vannkvalitet med rimelig sikkerhet.

Det er svært store kunnskapsmangler på dette området. For partikler/partikulært bundet fosfor vil det være mulig å finne ut om det på enkeltvise elvestrekninger vil være netto sedimentasjon (positiv effekt av oversvømmelser), men usikkerheten vil være stor, avhengig av fallet (gradienten) på elvestrekningen og tilstanden på arealene (spesielt vekst/jordarbeiding). For løst fosfor vil sannsynlig oversvømmelse ha en negativ effekt, men vi anser det som svært vanskelig å kvantifisere denne effekten.

For å gjøre en konkret utredning av virkningen av oversvømmelser på jordbruksarealene i Haldenvassdraget for vannkvaliteten i vassdraget, bør følgende datamateriale være/gjøres tilgjengelig: lengdeprofil av elva (helst også med flomlinjer), flomsonekart, flomfrekvensanalyser (med varighet), arealtilstander på flomutsatt areal, jordsmonnkart, jordas fosfortilstand (P-AL) og vegetasjonsbelter langs elva.

2 Innledning

Miljøprosjektet i Haldenvassdraget ønsket å få utredet hvilke effekter oversvømmelser har på vannkvaliteten i vassdraget. Siden vassdraget er regulert, vil det være viktig å få avklart om endret manøvrering av vannføring kan bidra til bedret vannkvalitet. Oppdraget ble i første omgang avgrenset til å foreta en kunnskapssammenstilling/litteraturstudie for å avklare om en slik vurdering er gjennomførbar på en faglig forsvarlig måte. Dersom dette synes gjennomførbart og oppdragsgiver ønsker det kan en i neste omgang gjennomføre en beregning for vassdraget. Fokuset er satt på fosfor (P) og partikler (SS). Det er også kun effekten av oversvømmelser på vannkvaliteten i vassdraget som er behandlet. Det innebærer at det ikke er tatt stilling til mulige skadelige eller gunstige effekter på jordbruksarealene som sådan som følge av oversvømmelser. Effekter av endrede flomfrekvenser (som følge av endret manøvreringsreglement) på forhold som har med selve elvestrengen å gjøre er heller ikke behandlet.

Økt fosformengde er ansett som den viktigste forklaringen på næringsforholdene i Haldenvassdraget. Dette forholdet har blitt påpekt av Jordforsk tidligere, og anbefalinger som er gitt har siden blitt fulgt opp med undersøkelser av partikler i dreinsvann fra jordbruksarealene i vassdraget (Jordforsk, 2004). Dette arbeidet omfattet imidlertid ikke erosjon og sedimenttransport i forbindelse med flom. I denne rapporten har vi fokusert på erosjon og mobilisering av fosfor fra dyrket mark og hvordan disse prosessene påvirkes i perioder med oversvømmelse. Fordi jorderosjon og partikkeltransport er styrt av de hydrologiske forholdene i vassdraget, oppsummerer vi kort hvilke prosesser i vassdraget som er viktig under flom, og hva som kan tenkes å påvirke flomsituasjonen i tiden framover (kap. 3). De jordfysiske prosessene som er viktig i denne sammenhengen er behandlet i to separate kapitler, overflateprosesser (kap. 4) og transportprosesser i selve jordprofilet (kap. 5). En vesentlig del av fosfortransporten er knyttet til partikler. Partiklene kan være enten organiske eller uorganiske. Analyser av kjemisk løselighet av fosfor viser imidlertid at denne transportmekanismen også kan ha betydning under gitte omstendigheter (kap. 6). Hensikten med denne rapporten er å beskrive generelle jordfysiske og jordkjemiske prosesser som er viktig i en flomsituasjon. Hvilke av disse prosessene som er relevante for Haldenvassdraget ligger utenfor mandatet i denne utredning.

3 Hydrologi og flom

Mandatet for denne rapporten er begrenset til å beskrive generelle prosesser. De hydrologiske prosessene er imidlertid styrt av klimatologiske- og fysiografiske forhold i vassdraget. Uten slik bakgrunnsinformasjon blir nødvendigvis beskrivelse av hydrologiske prosesser relativt teoretisk. Haldenvassdraget ble karakterisert med tanke på EUs vannrammedirektiv (NIVA, 2004) uten at de hydrologiske forholdene i vassdraget ble beskrevet særlig inngående. Blant annet mangler det beregninger av vannbalansen i vassdraget ut over årlige gjennomsnitt. Siden vassdraget er regulert, er dette informasjon som bør være relativt lett tilgjengelig. NVE gjennomførte en flomfrekvensanalyse i Haldenvassdraget i 1988, men det er f.eks. ikke gjennomført noen flomsonekartlegging av flomutsatte områder i regi av NVE. En interessant hydrologisk problemstilling vil være om det kan påvises endringer i flomsituasjonen i vassdraget. Er det f.eks. hyppigere vinterflommer i vassdraget, eller har det skjedd noen endring når det gjelder sannsynligheten for store flommer? ¹

Hovedkonklusjonen i karakteriseringsrapporten (NIVA, 2004) var at vannforekomstene i hovedvassdraget ikke vil tilfredsstille vanddirektivets krav om god vannstatus innen 2015 dersom det ikke settes inn målrettede tiltak. Rapporten påpeker interessemotsetninger i vassdraget langs tre dimensjoner; vannkvalitet; arealbruk; og energiproduksjon. I denne sammenhengen er det interessant å undersøke hvorvidt reguleringen av vassdraget påvirker flommønsteret i vassdraget. Dette gjelder både sesongmessige endringer og arealmessige endringer. Er det f.eks. endret sannsynlighet for vinterflomområder?

Haldenvassdraget utgjør (sammen med Glomma) de store elve- og innsjøsystemene i Østfold og Akershus. Vassdraget drenerer et areal på til sammen 1571 km², og lengden på vassdraget er ca. 130 km (nve.no). De høyeste partiene i vassdraget er Dragsjøhanken (268 moh.) sør for Årnes i Nes kommune i Akershus, og utløpet er i Iddefjorden ved Halden. Vassdraget er et typisk lavlandsvassdrag hvor store deler av arealet ligger under marin grense. Andel dyrka mark på norsk side av Haldenvassdraget er ca. 10%². Vassdraget var det første i Norge som ble regulert for transport. Etter den tid har vassdraget blitt gradvis regulert for kraftproduksjon.

Generelt om flom

Nedbørfeltets beskaffenhet har stor betydning for de hydrologiske prosessene under en flom. Store høydeforskjeller vil gi snøsmelting i de høyeste og laveste delene til forskjellig tid. Når snøsmeltingen i de høyeste delene (gjerne snaufjellet) kommer, kan arealene på de lavere delene være opptørket og uten avrenning i grøftene. I en slik situasjon vil det sannsynligvis være flomvannet som fyller opp jorda langs

¹NVEs (1988) flomfrekvensanalyse var basert på døgnliggjennomsnitt av vannføring fra Tistedalsfoss (ved utløpet av Femsjøen). I følge NVE (1988) var sannsynligheten 0.2 for å ha vannføringer over 100 m³/s. Tilsvarende er sannsynligheten 0.05 for vannføringen over 115 m³/s og 0.01 for vannføringer høyere enn 152 m³/s målt som døgngjennomsnitt. Det er interessant å merke seg at høsten 2000 kulminerte flommen i Tistedalsfoss på 150 m³/s. Det vil si at forventet gjentakintervall på 2000 flommen er bort i mot 100 år. Hvis det har vært vannføringer på dette nivået etter år 2000 er det god grunn til å analysere flomfrekvensmønsteret i vassdraget på nytt.

²Total arealet av Haldenvassdraget på norsk side, er 1594 km². Av dette er 172 km² dyrka mark i hht. jordbunnskartene. I 1999 var samla areal dyrka mark (dvs. åker og eng) i Halden-, Aremark-, Marker- og Aurskog-Høland er 222 km² (Tab. 3.4 i NIVA, 2004). Kommunegrensene sammenfaller imidlertid ikke med vassdragsgrensene i Haldenvassdraget. Det er også avrenning fra Sverige til Haldenvassdraget som også inneholder dyrka mark. Dette forholdet er heller ikke tatt med i forholdet mellom total areal og dyrka mark.

elva/innsjøene. I tilfeller hvor avrenningen skjer samtidig fra hele nedbørfeltet (regnværsepisode eller lave høydeforskjeller og samtidig snøsmelting) vil jorda langs elva/innsjøene mest sannsynlig bli fylt opp av sigevann og vann fra bakenforliggende arealer. Det kan være stor forskjell i kvaliteten på vannet som i disse to tilfellene fyller opp jorda, og dermed også på hvilken effekt oversvømmelsen har på vannkvaliteten. Fordelingen av dyrka mark og utmark har også betydning for kvaliteten av det vannet som fyller opp og evt. oversvømmer jorda.

Om arealene er systematisk drenert vil også ha stor betydning for de hydrologiske prosessene under oversvømmelser og prosessene som kan påvirke vannkvaliteten. Blant annet vil oppholdstiden for det drenerbare porevannet bli større på arealer som ikke er grøftet.

Teleforhold vil ha stor betydning for både vannkvaliteten og størrelse på flommen under en snøsmeltingsflom eller regnflom som skjer i vintersesongen.

Generelt er det slik at i store vassdrag med store fjellområder er det snøsmelting som gir de største flommene, mens det i mindre vassdrag er regnvær (eventuelt kombinert med snøsmelting).

4 Erosjon og sedimentasjon på dyrka mark

Med overvann forstås det vannet som er oppå jorda under en oversvømmelse. Prosesser som vil påvirke vannkvaliteten (partikler og fosfor) i overvannet/overflateavrenningen under en flom/oversvømmelse er:

- Erosjon
- Sedimentasjon
- Utløsning av P fra planterester og husdyrgjødsel på jordoverflaten
- Utløsning av P fra jordoverflaten (se kap. 6)

Erosjon/sedimentasjon

Når arealer blir oversvømmet kan det oppstå både erosjon og sedimentasjon. I siste del av flommen, vil det nesten alltid skje litt sedimentasjon. I hvilken grad det skjer erosjon avhenger av:

- vannhastigheten inne på arealene
- arealtilstanden (erodibiliteten av jorda)

Vannhastighet

De viktigste faktorene for vannhastighet inne på elveslettene er gradienten på vannoverflaten og vanndybden. På en gitt elveslette vil vannhastigheten øke med flomstørrelsen, slik at det ved små oversvømmelser kan være bare sedimentering som foregår mens det ved større flomepisoder også kan være erosjon. Dette bildet vil imidlertid i mange tilfeller være modifisert av de lokale forhold. Hvis vannet under en flomperiode flyter inn over elveløpets nærliggende områder, men i hovedsak er skjermet fra selve strømningsløpet, vil de oversvømte arealene i større grad fungere som et forsinkelsesbasseng enn som en utvidelse av elveløpet.

I Hydra-prosjektet ble det gjort en regresjonsanalyse med data fra erosjon og graveskader etter flommen i Glomma og Lågen i 1995 (kartlagt av JORDFORSK, Øygarden et al. 1996). Det ble funnet at tap av ploglag og alvorligere graveskader var korrelert med vannhastighet beregnet v.h.a. Mannings formel. Risikoen for erosjon øker med roten av fallet i elva (gradienten) (Sælthun et al. 2000). På strekningen nord for Elverum (i Glomma) tilsvarte sedimentert materiale ca 1/3 av de eroderte massene slik at her var nettoeffekten økt innhold av partikler i ellevannet. På de flatere strekningene i Solør var graveskadene knyttet til brudd i flomverk med store avsetninger nedstrøms bruddene.

Flommen i 1995 i Glomma og Lågen var en ekstremflom, og dermed noe spesiell i forhold til oversvømmelser som opptrer mer normalt. I Norge foreligger det ikke detaljerte undersøkelser etter flom som ikke har hatt slike dramatiske konsekvenser. Vi har derfor innhentet opplysninger fra flomprosjekter i andre land. I de flate områdene i Red River Basin (Nord Dakota, USA), ble det ikke funnet noen signifikant negativ effekt for hverken jordbruksdrift eller miljøet (vannkvalitet) etter kortvarige oversvømmelser (vårflom i 2004).

Olde Venterink et. al. (2003) undersøkte 2 elvesletter i Rhinen-vassdraget og fant ingen retensjon (tilbakeholdelse) av fosfor på den ene elvesletten. På den andre elvesletten derimot var det en retensjon på 20-45 %. På elvesletten uten retensjon var vannhastigheten for stor til å få sedimentasjon ved de flomvannføringsene som fant sted under målingene. Vannhastigheten kan også være avhengig av egenskaper ved elva ovenfor det oversvømte arealet. Dersom det er stort fall her, vil vannet ha stor hastighet idet det strømmer inn på arealene. Vegetasjonsbelter vil her kunne være effektive fartsdempere, såfremt de er brede nok og sammenhengende. Åpninger i vegetasjonsbeltet vil føre til konsentrert innstrømming med kraftig graving i innløpet. Dette var en av de viktigste årsakene til graveskader under flommen i Glomma/Lågen i 1995 når en ser bort fra brudd i flomverk og sideelver som tok nye løp (Øygarden et al. 1996).

Vegetasjonsbelter er også effektive sedimentfeller. I en undersøkelse i Ringebru med sedimentasjonsplater plassert i ulike avstand fra elva i ett innstrømningsområde, ble det målt 5-15 cm sedimentasjon på platene nærmest elva (ca 10 m fra) og bare 2-4 cm på platene 30 m fra elva (Eggestad et al. 2007). Lenger nede langs elva var det satt ut sedimentasjonsplater inne på jordbruksarealet, som ble brukt til grasdyrking. Her var det bare sedimentert et tynt lag på deler av platene. Denne undersøkelsen indikerer at det kan være en positiv effekt av oversvømmelse på vannets innhold av partikler og dermed partikulært bundet fosfor. Det ble ikke analysert for fosfor i avsetningene på platene. Stor vannhastighet i elva gjør også at vannet kan innholde store mengder suspendert materiale. Når vannet strømmer inn på elvesletten mister det hastighet og hvis partikkelinnholdet er stort nok, vil det skje sedimentering uansett om det ikke er vegetasjonsbelter langs elva.

Arealtilstand

Tilstanden på arealene betyr mye for erosjonsmotstanden. Ligger arealene i permanent gras skal det sterk strøm til for å få erosjon. Flommen i 1995 kom i begynnelsen av juni mens ploglaget fremdeles var løst etter jordarbeiding og såing. Hele ploglaget ble erodert vekk på store deler av korn og potetarealet langs Glomma nord for Elverum (Øygarden et al. 1996). Denne flommen, som var en ekstremepisode, hadde negative effekter på vannkvaliteten med borttransport av både partikler og fosfor. Det er gjort en god del på erodibilitetsfaktorer for ulike arealtilstander for beregning av generell erosjonsrisiko, men slike faktorer er ment å gjelde for et driftsopplegg over ett helt år og blir dermed ikke overførbart til en episode. Effekten av nedbør er også fraværende i på jord som er oversvømmet og vannstrøm på et oversvømmet areal vil også ha en annen effekt enn vann som sildrer i overflaten. Det er ikke funnet noe litteratur på hvordan erodibiliteten varierer med arealtilstanden under en flom situasjon.

Utløsning av P fra planterester og husdyrgjødsel på jordoverflaten

Ved frysing av planterester/vegetasjonsdekke sprenges plantecellene og fosfor vil kunne løses ut. Oversvømmelser som skjer etter frost kan ta opp noe av dette fosforet. Uhlen (1989) har i lysimeterforsøk med gras (eng) funnet en relativt god sammenheng mellom tap av fosfor og gjenvekst om høsten, avrenning i snøsmeltingen og fosforgjødsling foregående år. Også Bechmann (2005) har i laboratorieforsøk påvist frigjøring av fosfor ved frysing/tining av raigras, og at frigjorte mengder øker med antall fryse/tine sykluser. Ustabile vintrer kan gi mange fryse/tine sykluser. Tilførsel av husdyrgjødsel (innblandet i jorda) ga ingen signifikant økning i fosfor lekkasjen. Ved beiting blir husdyrgjødsel liggende på jordoverflaten, og vil representere en risiko for tap, men det er ikke funnet litteratur som belyser dette. Beiting foregår neppe i et omfang som har betydning for fosfortap i Haldenvassdraget (Bechmann, 2005).

5 Partikkeltransport gjennom grøftesystem

Partikkeltransport i jordprofilet

På norske leirjordsarealer av marint opphav er partikkeltransport fra de øverste jordlagene og avsetning av partiklene dypere ned i profilet en naturlig prosess. Dette kommer blant annet fram på NIJOS' (Skog og Landskap) jordsmonnkart der jordtyper med leirnedvasking skilles ut som egne enheter. Prosessen er også beskrevet i andre publikasjoner fra jordundersøkelser fra denne type arealer, blant annet av Sveistrup et al. (2005). Leirpartikkeltransporten foregår vanligvis fra den øverste halvmeteren av jordlagene og avsettes under dette dypet, ned til 1 m eller dypere. Både utvaskingssjiktets tykkelse og avsetningssjiktets tykkelse varierer mye ut fra lokale forhold.

Klimatiske betingelser og konsekvenser

Nedvaskingen av leirpartikler er avhengig av vekslning mellom opptørking og oppfukting av jordsmonnet, (Soil Survey Staff 1999, Yaalon 1983). Tørke og oppfukting skjer i alle norske leirjordsområder, og de fleste steder både sommer og vinter. Tørken om sommeren er betinget av plantenes vannforbruk og fordampning, mens vinteruttørringen er betinget av frost med teledannelse. Uttørringen som frosten skaper kan bli mye sterkere enn den planteveksten og fordampningen forårsaker. (Planteveksten kan suge ut vann som er bundet opp til visnegrensen, pF 4.2, mens det teoretiske suget på overflaten på iskrystaller som dannes ved teledannelse, er pF 6.2.) En slik sterk uttørring hvor vannet konsentreres og fryser ut som iskrystaller samtidig som jordmassen ellers tørkes ekstremt ut, bidrar til at jorda sprekker opp og lett fraksjoneres. I tillegg vil iskrystalldannelsen bidra til istykkersprengning og fraksjonering av jordmassen.

Fysio-kjemiske betingelser og konsekvenser

De norske leirjordsområdene (også Haldenvassdraget) har gunstige fysio-kjemiske forhold for leirpartikkeltransport ned igjennom jordprofilet. Jorda er ikke kalsiummettet (pH under ca 8) (De Coninck 1978), men pH er heller ikke for lav (pH over ca 5.5).

Innvirkning av grøfting på partikkeltransport i og ut av jordprofilet

For at grøfter skal fungere etter sin hensikt, må det ikke slammes til, verken inne i rørene eller rundt rørene slik at innstrømmingen hindres. Uten grøfting vil det aller meste av partikler som vaskes ned gjennom profilet akkumuleres i de dypere jordlag. Grøftingen muliggjør at partikler også transporteres ut av jordsystemet. Studier har vist at makroporer gir en rask transport av vann med partikler fra øvre jordlag og ned til grøfterør. Studiene viste også at ikke bare skjer fra jorda rett over grøfta, men også fra jorda til side for grøfta (Sveistrup & Haraldsen 1999). De samme undersøkelsene viser hvordan partikler langs porevegger delvis skilles fra resten av jorda gjennom uttørring og blir utsatt for å bli vasket med vannstrøm gjennom porene.

Påvirkning av flom

Når arealer oversvømmes, fylles jordas poresystem med vann. Jo sterkere en forutgående uttørring har vært, jo mer vil jordmassen være fraksjonert gjennom uttørringen. Når slik jord oversvømmes, vil jordmassen i det uttørrede laget, og da spesielt frostuttørret jord, lett bli overmettet med vann. Det kan føre til at jordstrukturen kan kollapse helt, og jorda bli helt oppslemmet. Det er et kjent fenomen på høstpløyde

leirjord at vann blir stående i søkk på jordoverflata under mildperioder om vinteren og våren med nedbør og snøsmelting. Slike søkk kan etter at vannet har drenert bort lett avgrenses ved at en vil se at jordstrukturen i ploglaget vil være mer eller mindre kollapset på de områdene som har stått under vann. Når overflatevann og porevann i jorda renner bort når en flom trekker seg tilbake, vil oppslemmet jordmateriale følge vannstrømmen. Etter at overflateavrenningen er avsluttet, vil drenering av vann fra overflatesøkk med oppslemmet jord og fra poreveggene med jordmasse delvis løst fra poreveggene fortsette gjennom grøftesystemet.

Hvor store andel av avrenning og partikkeltransport fra et areal som skjer gjennom grøftesystemet varierer sterkt fra sted til sted, med vær og klima og bruken av arealene. På en leirjordslokalitet der det alt vesentlige av partikkeltapet fra arealet skjedde gjennom grøftesystemet (mer enn 93 %), ble det observert erosjon av jordmateriale i makroporer i ploglaget og i plogsålen og sedimentasjon i makroporer i grøftedybde i tillegg til om lag 40 til 60 kg jord per dekar og år. I denne undersøkelsen ble det konkludert med at erosjonsmaterialet i hovedsak stammet fra erosjon internt i jordprofilet siden det var liten forskjell mellom mengde erosjonsmateriale fra år med åker og år med eng (Sveistup & Haraldsen 1999). Mikroskopstudier av jorda viste at jordmateriale gjennom uttørring i vintersesongen hadde gitt jord løst fra poreveggene i ploglag og plogsåle. Det må forventes at gjennomstrømningen av poresystemene som drenering av oversvømmelsesvann vil medføre, vil kunne øke den interne erosjonen i jorda og tap av jordmateriale.

6 Frigjøring av løst fosfor fra jord

Fosfor i jord

Det totale fosforinnholdet i dyrka mineraljord er i størrelsesorden 1000 mg per kg jord, dvs. 200-250 kg P/daa i matjordlaget. Variasjonsbredden er imidlertid stor, men generelt finner en et høyere totalfosforinnhold i leirjord enn i sandjord. 20-50 % av fosforet er organisk bundet, og P-AL ("plantetilgjengelig" P) utgjør i størrelsesorden 10 % av total P. Ved økende P-AL tall, øker P-AL andelen av total P, dvs ved høye P-AL tall er en større andel av total P lett tilgjengelig enn ved lave P-AL tall. Det aller meste av fosforet i jorda er partikkelbundet. Fosfor løst i jordvæsken utgjør bare 0.01 – 0.1 kg P/daa i plogsjiktet. En betydelig del av fosforet i mineraljord med $\text{pH} < 7$ er bundet til jernoksider. Ved et redokspotensialet på $< 100 \text{ mV}$ vil jernet reduseres og fosforet vil da kunne frigjøres. I organisk jord blir tilført fosfor svakt bundet, slik at overskudd av gjødsel fosfor blir lett vasket ut.

Mulig effekt av oversvømmelse på frigjøring av P fra jord

Mengden fosfor som er i løsnings i jord er styrt av likevektskonsentrasjonen. For fosfor er likevektskonsentrasjonen lav (0.1-5 mg P/l), slik at ved vanlige fuktighetsforhold er det aller meste av fosforet partikkelbundet. Ved flom kommer overflatejorda i kontakt med store mengder vann som har en lavere konsentrasjon av løst P enn likevektskonsentrasjonen i jorda. Følgelig vil jordpartiklene gi fra seg fosfor til flomvannet. Mengden fosfor som går ut i vannet vil avhenge av hvor stor del av overflatejorda som står i god kontakt med vannet, jordas innhold av lett tilgjengelig fosfor (P-AL) og flomvannets saltkonsentrasjon. En tidligere laboriestedie viste at en betydelig mengde partikkelbundet P ble løst når væske:jord forholdet ble økt opp til 2000:1, og jordas P-AL tall hadde stor betydning for mengden fosfor som ble løst ut (Øgaard, 1995). Saltkonsentrasjonen har betydning for mengden fosfor som løses ut slik at jo lavere saltkonsentrasjon, jo mer fosfor løses ut. Mengden jord som står i god kontakt med flomvannet er sannsynligvis avhengig av hvor løs og ujevn overflatejorda er ved oversvømmelse. Sannsynligvis vil en vegetasjonsdekket jord gi fra seg mindre løst fosfor til flomvannet enn en jord som har en løs og ujevn overflate etter jordarbeiding.

Vi har ikke funnet undersøkelser som viser fosforfrigjøring fra dyrka jord under oversvømmelse som er representative for våre forhold. Vi kan imidlertid gjøre et overslag på fosfortapet ved flom ut i fra laboriestediet som er nevnt ovenfor og ligninger som er utarbeidet fra dette (Øgaard og Krogstad, 1995). Den store usikkerheten her er hvor mye av overflatejorda som står i god kontakt med flomvannet, slik at fosfor raskt kan frigjøres direkte til flomvannet uten å gå via diffusjonsprosesser i jordas porer. I beregningene som er gjort her er det antatt at den øverste centimeteren med jord gir fra seg like mye løst fosfor som i laboriestediet ved væske:jord forhold på 2000:1. Dette forutsetter nok at det øverste jordlag er jordarbeidet etter høsting. En cm jordlag tilsvarer ca 10.000 kg jord/daa. Den avhengige variabelen y , i dette regnestykket er mengden løst fosfor som frigjøres. Den uavhengige variabelen x , er som nevnt jordas P-AL tall, og følgende sammenheng er funnet ut ifra laboriestediet:

$$y = 0.25 x + 0.42,$$

hvor y er mg P/100 g jord, og x er jordas P-AL.

Potensialet for frigjøring av mengde løst fosfor som kan frigjøres fra ett cm jordlag ved ulike P-AL tall er

beregnet ved hjelp av ligningen ovenfor (Tabell 1). Fordi ligningen ovenfor er basert på en laboratoriestudie, må nødvendigvis usikkerheten i beregningene være stor. Laboratoriestudier viser at frigjøringen av fosfor går raskt. Noen få timer med god kontakt mellom jord og vann er tilstrekkelig for å frigjøre det vannløselige fosforet.

Tabell 1: Beregnet mengde løst fosfor som frigjøres til flomvannet ved ulike P-AL tall. Usikkerhet i parentes.

P-AL mg P/100g jord	Frigjort P mg P/kg jord	Frigjort P g P/daa*
5	17 (+/- 8)	170 (+/- 80)
10	29 (+/- 15)	290 (+/- 150)
15	42 (+/- 21)	420 (+/- 210)
20	54 (+/- 27)	540 (+/- 270)

* Forutsetter 10.000 kg jord per daa som står i god kontakt med flomvannet

Det må understrekes at disse beregningene ikke kan brukes som annet en antydning på hva flom kan bety for frigjøring av løst fosfor. For P-AL 10 og høyere er tallene i overkant av det som en har målt som middel tap av totalfosfor per år fra jordbruksarealer i Bioforsk Jord og miljø sine overvåkingsfelt med korn som dominerende vekst.

Når oversvømmelsen er over, dreneres porevannet i jorda. Dette vannet vil sannsynligvis ha tilnærmet likevekt mellom bundet og løst fosfor. Dersom mye av dette vannet dreneres via sprekker og makroporer, kan det være det mest fosforrike vannet som renner av under en flomepisode. Og det kommer i siste del av flommen og vil kunne få en relativt stor innflytelse på vannkvaliten i resipienten.

Et spørsmål i forbindelse med oversvømmelse av dyrka jord er om det oppstår anaerobe forhold som fremmer utløsningen av fosfor på grunn av reduksjon av jernoksider. Dette er det heller ikke lett å finne svar på i litteraturen, men en undersøkelse av redokspotensialet i en fangdam kan gi en antydning om hva en kan forvente i en flomsituasjon. I fangdammen ble det i løpet av et år registrert kun en kort periode med redokspotensialet mindre enn 100 mV, dvs. under det redokspotensialet hvor reduksjon av jern kan foregå (Braskerud og Løvstad, 2002). Redoks-reaksjoner er imidlertid ofte langsomme, slik at en kort periode med tilstrekkelig lavt redokspotensial neppe har betydning for frigjøring av fosfor. Ved oversvømmelse vil vanndybden være liten sammenlignet med en innsjø, og det vil også ofte være en strøm i vannet som tilfører nytt oksygenrikt vann. I tillegg opptrer gjerne flom i perioder med lav temperatur, slik at biologiske oksygenforbrukende prosesser er relativt langsomme. En kan derfor anta at reduksjon av jernoksider og tilhørende frigjøring av fosfor neppe er en aktuell prosess ved oversvømmelse.

7 Konklusjoner

Det er ikke funnet mange undersøkelser som har målt effekten av oversvømmelser på vannkvaliteten i flomvannet. En undersøkelse i Rhinenvassdraget fant god effekt på tilbakeholdelsen (målt som forskjell mellom transport inn og ut av elvesletten) av total-fosfor på en elveslette (20-45 %) og ingen effekt på en annen elveslette. En undersøkelse i USA (Nord Dakota) fant ingen signifikant negativ effekt av kortvarige oversvømmelser på vannkvaliteten.

En norsk undersøkelse av flomskader under storflommen i 1995 (Glomma og Lågen) fant god sammenheng mellom vannhastighet på elveslettene og erosjon og graveskader. Jordarten på elveslettene i disse to vassdragene er imidlertid helt forskjellig fra de marine leirjordene i områder som Haldenvassdraget. Disse leirjordene vil kunne bidra med partikkeltap også gjennom grøftesystemer. Flommen i 1995 med erosjon var negativ både for vannkvaliteten (erosjon og fosfor) og for dyrkingsmulighetene på jordbruksarealene.

Når det gjelder mindre flommer eller oversvømmelser som gjentas relativt regelmessig er det store kunnskapsmangler om hvordan oversvømmelser påvirker vannkvaliteten i flomvannet, både med hensyn på partikler (partikulært fosfor) og løst fosfor. Om det skjer netto erosjon eller sedimentasjon avhenger av vannhastighet på vannet som oversvømmer arealene, oversvømmelsens varighet og jordas erosjonsmotstand. Erosjonsmotstanden avhenger av jordart, moldinnhold og vekst/jordarbeiding. Frost forut for oversvømmelsen vil også påvirke erosjonsmotstanden. Det er ikke funnet noen kvantifiserte sammenhenger mellom disse faktorene i litteraturen.

Når det gjelder løst fosfor, er det ikke funnet noen konkrete undersøkelser av hva som skjer av binding eller frigjøring under oversvømmelser, men noen laboratorieforsøk indikerer at frigjøring via kjemiske likevekter kan være betydelig. Effekt av eventuelle anaerobe forhold i porevannet og frigjøring av fosfor bundet til jern, er det heller ikke funnet noen undersøkelser av.

Flom som oppstår i tiden like etter såing og gjødsling vil kunne få ekstra store konsekvenser, både iform av erosjon og utlekking av fosfor fra gjødsla på åkerarealer. Konsekvensene kan også bli store der gjødsla spres på overflaten som ved grasdyrking og høstkorn.

Litteraturgjennomgangen gir få holdepunkter for å kunne gjøre en vurdering av effekter av oversvømmelser på vannkvalitet i Haldenvassdraget med rimelig sikkerhet.

Det er svært store kunnskapsmangler på dette området. For partikler/partikulært bundet fosfor vil det være mulig å finne ut om det på enkeltvis elvestrekninger vil være netto sedimentasjon (positiv effekt av oversvømmelser), men usikkerheten vil være stor, avhengig av fallet (gradienten) på elvestrekningen og tilstanden på arealene (spesielt vekst/jordarbeiding). For løst fosfor vil sannsynlig oversvømmelse ha en negativ effekt, men vi anser det som svært vanskelig å kvantifisere denne effekten.

For å gjøre en konkret utredning av virkningen av oversvømmelser på jordbruksarealene i Haldenvassdraget for vannkvaliteten i vassdraget, bør følgende datamateriale være/gjøres tilgjengelig: lengdeprofil av elva (helst også med flomlinjer), flomsonekart, flomfrekvensanalyser (med varighet), arealtilstander på flomutsatt areal, jordsmonnkart, jordas fosfortilstand (P-AL) og vegetasjonsbelter langs elva.

8 Referanser

- Bechmann M., P.J.A. Kleinman, A.N. Sharpley and L.S. Saporito (2005): Freeze-Thaw Effects on Phosphorous Loss in Runoff from Manured and Catch-Cropped Soils. J. Environ. Qual. 34:2301-2309.
- Benestad, R.E., (2006): Future Changes in Extreme Rainfall over Northern Europe, In: Iversen, T., and Lystad, M. (ed), Regional climate development under global warming, General technical report no. 9
- Bogen, J., Bønsnes, T.E. (2001): Virkninger av effektregering på erosjon og sedimentasjon i vannkraftmagasiner. Effektregering – miljøvirkninger og konfliktreduerende tiltak. Rapport nr 16, Statkraft Grøner, 66 s.
- Bogen, J., Bønsnes, T.E., (2002): Virkninger av effektregering på erosjon og sedimentasjon (<http://www.nve.no/FileArchive/173/Effektregering.pdf>)
- Braskerud, B. & Løvstad Ø. (2002): Tilbakeholding av algetilgjengelig fosfor i konstruerte våtmarker. Rapport nr. 83/02, Jordforsk. 34 s.
- De Coninck, F. (1978): Physico-chemical aspects of Pedogenesis. Lecture notes 154 pp, p 123-126. International Training Centre for Postgraduate Soil Scientists, Rijksuniversiteit Gent, België.
- Eggestad H.O. og N. Syversen (2007): Flomutsatte elvesletter. Sedimentasjon og jordkvalitet. Bioforskrapport in prep.
- Førde, E. og Brodtkorb, E. (2001): Sluttrapport fra FoU-prosjektet Effektregering - miljøvirkninger og konfliktreduerende tiltak", 1996-2001. Rapport nr 20 Statkraft Grøner
- Jordforsk (2004): Landbruk og spredt avløp- tilførsler og anbefalte tiltak, Rapport 56/2004
- NIVA (2004): Karakterisering, Haldenvassdraget med utenforliggende fjordområder, RAPPORT LNR 4785-2004
- NVE (1988): Flomberegning Haldenvassdraget, Oppdragsrapport 8-1988.
- Olde Venterink H., F. Wiegman, G.E.M. Van der Lee and J.E. Vermaat (2003): Role of Active Floodplains for Nutrient Retention in the River Rhine. J. Environ. Qual. 32:1430-1435 (2003).
- Pounder, E.R. (1965): Physics of ice. Pergamon Press, 151 pp.
- Regclim (2005): http://regclim.met.no/index_en.html
- Schenk, E. (1968): Fundamental processes of freezing and thawing in relation to the development of permafrost. In: Alpine and Arctic Environment, Eds. E. Wright and W. Osborn, p. 229-236.
- Soil Survey Staff (1999): Soil Taxonomy. USDA, Natural Resources Conservation Service. Agricultural Handbook No. 436. 869 pp.

- Sveistrup, T.E. & T.K. Haraldsen (1999): Influence of macroporosity on surface runoff and water transport through a silt loam soil in Central Norway. NJF seminar nr. 304: Drainage and water management in agriculture. Benefits and conflicts. 26-28.05.1999. Lohusalu/Tallinn, Estonia.
- Sveistrup, T.E., T.K. Haraldsen, R. Langohr, V. Marcelino & J. Kværner (2005): Impact of land use and seasonal freezing on morphological and physical properties of silty Norwegian soils. Soil & Tillage Research 81: 39-56.
- Sælthun N.R., L. Gottschalk, I. Krasovskaia, H. Berg, A. Voksø, S.E. Kristensen, H.O. Eggestad, M. Skoglund og M. Vathne (2000): Økonomisk risikoanalyse for flommer. Hydra-rapport nr. R03. NVE. ISBN: 82-410-0425-7.
- Uhlen G. (1989): Surface runoff losses of phosphorus and other nutrient elements from fertilized grassland. Norwegian Journal of Agricultural Sciences 3:47-55. ISSN -0801-5341.
- Waffle Project (2004): Results of the spring 2004 Waffle Project Field Trial. Energy and Environmental Research Center (EERC), University of North Dakota, USA.
- Yaalon, D.H. (1983): Climate, time and soil development. In: Pedogenesis and Soil Taxonomy, Eds. L.P. Wilding, N.E. Smeck and G.F. Hall, p 233 – 251.
- Øgaard, A.F. (1995): Effect of phosphorus fertilization and content of plant-available phosphorus (P-AL) on algal-available phosphorus in soils. Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Sci., 45: 242-250.
- Øgaard, A.F. & Krogstad, T. (1995): Grunnlag for estimering av fosforavrenning fra dyrka mark. Rapport nr.1/95, Inst. for jord- og vannfag, NLH. 12s.
- Øygarden L., H.O. Eggestad, W.J.F. Standring, G. Goffeng og N. Vagstad (1996). Flommen i 1995. Skader på jordbruksarealene langs Glomma og Gudbrandsdalslågen. Jordforskrapport 29/96. ISBN: 82-7467-185-6.